

Análise comparativa da influência de diferentes modelos de emissões de tráfego rodoviário na qualidade do ar da cidade de Aveiro

Bruno VICENTE¹, Sandra RAFAEL¹, Vera RODRIGUES¹, João TEIXEIRA², Jorge BANDEIRA², Margarida C. COELHO², Carlos BORREGO¹

¹ CESAM e Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal

² TEMA e Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal

brunovicente@ua.pt, sandra.rafael@ua.pt, vera.rodriques@ua.pt, jpteixeira@ua.pt, jorgebandeira@ua.pt, margarida.coelho@ua.pt, cborrego@ua.pt

Resumo

A influência de diferentes modelos de emissões de tráfego rodoviário (TREM e VSP) no desempenho do modelo de qualidade do ar CFD VADIS foi avaliada neste trabalho, tendo como caso de estudo um bairro típico da cidade de Aveiro. Foram analisados dois poluentes (NOx e PM10). Para o poluente NOx foi obtido um desempenho adequado do modelo CFD com as duas metodologias de emissões; foi ainda analisada a influência das concentrações de fundo nesta estimativa. Para as concentrações de PM10, os resultados revelaram que o tráfego rodoviário não é a principal fonte de emissão da área de estudo, tendo a combustão residencial um papel preponderante face ao período de estudo. Os resultados reforçam a relevância da precisão dos dados de emissões como condição inicial dos modelos de qualidade do ar.

Introdução

Apesar dos níveis de concentração de poluentes atmosféricos terem sido reduzidos nas duas últimas décadas, continuam a verificar-se excedências aos valores limite nas áreas urbanas na União Europeia (UE). O crescimento das áreas urbanas, aliado ao crescente aumento da densidade populacional e da mobilidade urbana, têm contribuído para uma contínua pressão sobre o setor dos transportes, nomeadamente o transporte rodoviário, e, conseqüentemente, das suas emissões. As normas Euro aplicáveis aos veículos foram insuficientes para reduzir as emissões reais de óxidos de azoto (NOx) para os níveis fixados na legislação, pelo que o transporte rodoviário continua a ser um setor estratégico para a melhoria da qualidade do ar.¹

A UE considera como estratégia fundamental o uso eficiente das infraestruturas existentes para reduzir externalidades dos transportes (ex. impactes na saúde). De acordo com a literatura, o recurso a sistemas de transportes integrados, inteligentes

e sustentáveis, permitirá, por exemplo, a repartição do tráfego por diferentes rotas, ou a escolha de uma determinada rota face à informação disponibilizada por eco-indicadores (económicos, ambientais e de bem-estar).

A modelação numérica com recurso a modelos CFD tem evoluído nos últimos anos como uma ferramenta de apoio à avaliação do conforto e saúde humana, tanto em termos da análise do escoamento atmosférico, como na avaliação da qualidade do ar à escala urbana. Um dos principais desafios na modelação numérica é a obtenção de informação associada às emissões atmosféricas, o que a uma escala urbana se prende com a estimativa de emissões de tráfego rodoviário. Os inventários de emissões atmosféricas são geralmente construídos através de uma das seguintes abordagens: i) *top-down*, baseada no processo de desagregação das emissões totais de uma determinada área, para uma área administrativa mais pequena; ii) *bottom-up*, baseada na estimativa de emissões usando dados detalhados de cada uma das fontes de emissão.²

Neste contexto, o objetivo do presente estudo prende-se com a avaliação da influência de diferentes métodos de estimativa de emissões, segundo uma abordagem *bottom-up*, no desempenho do modelo CFD VADIS (*Pollutant dispersion in the atmosphere under variable wind conditions*). Uma área urbana típica da cidade de Aveiro foi considerada como caso de estudo e dois poluentes foram analisados, óxidos de azoto (NO_x) e material particulado com um diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 10 µm (PM).

Metodologia

O caso de estudo selecionado é centrado numa avenida principal na cidade de Aveiro, a Avenida 25 de Abril (Figura 1). Esta avenida localiza-se perto do centro da cidade (1 km a Este do centro), tendo na sua envolvente uma zona residencial que inclui duas escolas secundárias e uma estação de monitorização da qualidade do ar (EQA, classificada como estação urbana de tráfego de acordo com a tipologia da fonte de emissão). O domínio de estudo considera 297 edifícios, com alturas que variam entre os 3 m e 24 m, e um total de 310 árvores com uma altura variável (tronco e copa) entre os 3 e 15 m. No que diz respeito às condições meteorológicas locais, a área de estudo é caracterizada por ventos dominantes de Noroeste com velocidades a variar entre 2 e 6 m·s⁻¹.

No domínio considera-se uma única fonte de emissão, neste caso a avenida principal (com elevado fluxo de tráfego rodoviário), uma vez que as estradas perpendiculares, que conduzem à avenida principal, apresentam um volume de tráfego muito inferior.

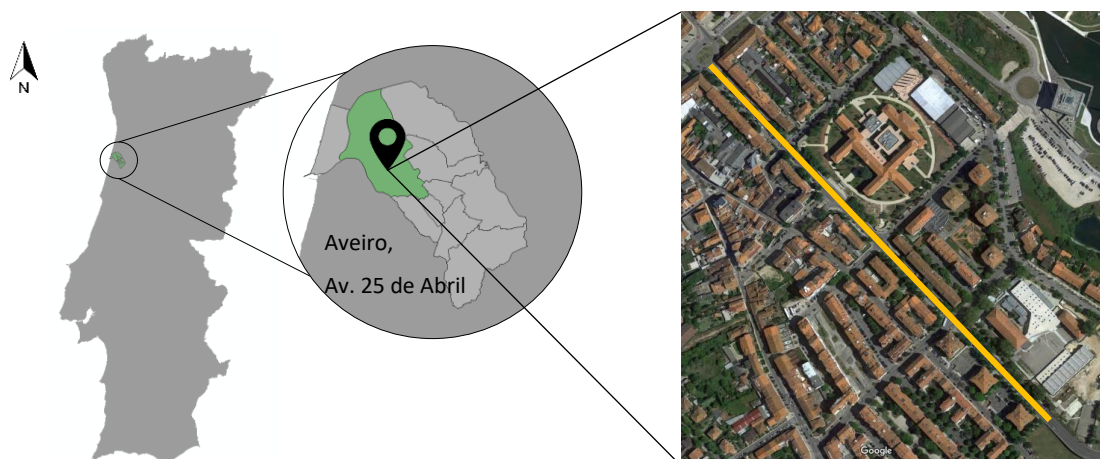


Figura 1: Localização geográfica da Avenida 25 de Abril: região centro de Portugal.

Estimativa de emissões de tráfego rodoviário

A estimativa de emissões de tráfego rodoviário para o caso de estudo seguiu uma abordagem *bottom-up*, que permite o cálculo detalhado das emissões das fontes mais importantes da região. A aplicação desta abordagem pressupõe a caracterização detalhada da tipologia de via, do volume de tráfego e do respetivo parque automóvel. A obtenção destes dados foi conseguida através de uma campanha experimental, que seguiu uma metodologia faseada: 1) recolha de dados dinâmicos ao longo da avenida utilizando dispositivos de recolha de dados GNSS (sistemas globais de navegação por satélite) inseridos em dois veículos diferentes e 2) contagem do número de veículos utilizando duas câmaras posicionadas no início e final da via (Figura 2).



Figura 2: Identificação dos segmentos considerados para estimativa das emissões ao longo da Avenida 25 de Abril, Aveiro. Fonte: Google Maps®.

A avenida foi dividida em 5 segmentos diferentes (conectando diferentes interseções), para o qual foram estimadas emissões totais por segmento por hora. A campanha experimental decorreu no dia 7 de fevereiro de 2017. Tendo como

objetivo avaliar a influência de diferentes métodos de cálculo de emissões na modelação da qualidade do ar, dois modelos foram aplicados para a estimativa de emissões: o VSP (*Vehicle Specific Power*) e o TREM (*TRansport Emission Model for line sources*).

Modelo de emissões VSP

O modelo VSP é baseado no conceito de potência específica do veículo, permitindo estimar emissões instantâneas, tendo por base os dados relativos à dinâmica dos veículos (velocidade instantânea, aceleração/desaceleração, e declive da via). Estas variáveis são traduzidas em 14 modos com diferentes fatores de emissão.³ A aplicabilidade do modelo na estimativa de emissões para veículos ligeiros com motorizações Diesel (gasóleo) e Otto (gasolina) tem vindo a ser comprovada em estudos anteriormente realizados.⁴ A Equação 1 apresenta a formulação do VSP para veículos ligeiros de passageiros e comerciais:

$$VSP = v \times [1,1 \times a + 9,81 \times \sin(\arctan(\text{grade})) + 0,132] + 0,00032 \times v^3 \quad (1)$$

A variável *VSP* é a potência específica do veículo ($\text{kW} \cdot \text{ton}^{-1}$); *v* é a velocidade instantânea do veículo (m/s); *a* é a aceleração instantânea do veículo ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); *grade* é o declive da estrada no momento (%). O modelo VSP foi aplicado usando duas bases de dados distintas: i) o parque automóvel nacional, classificado em veículos ligeiros (77% ligeiros de passageiros e 20% ligeiros comerciais) e divididos em veículos com motores Diesel (68%) e Otto (32%); ii) o parque automóvel disponível no *software* COPERT (*Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport*) relativos à frota nacional portuguesa (23% - veículo diesel com mais de 2500 cm^3 , 19% - veículo diesel até 1900 cm^3 , 36% - veículo a gasolina até 1400 cm^3 , 6% - veículo a gasolina até 1800 cm^3 , e 0,6% - veículo a gasolina com mais de 2000 cm^3).⁵ A qualidade, a integridade e a consistência dos conjuntos de dados (composição da frota e atividade anual por categoria de veículo) foram amplamente verificadas.⁵ Para facilitar a leitura do artigo e a análise dos resultados, foi adotada a seguinte nomenclatura: VSP-C, para o modelo VSP utilizando a base de dados do parque automóvel do *software* COPERT; e VSP, para o modelo VSP tendo por base os dados do parque automóvel nacional (através dos dados disponibilizados pela Associação de Comércio Automóvel de Portugal - ACAP).

Os valores VSP são, posteriormente, convertidos em modos para os quais existe um determinado fator de emissão para cada poluente (Figura 3). Estes modos representam o comportamento do veículo; os modos VSP 1 e 2 estão relacionados com momentos em que o veículo inicia ou termina a marcha como também acelerações/desacelerações bruscas, os modos 3 a 5 indicam o movimento a velocidades baixas, os modos compreendidos entre 5 e 9 representam o movimento

a velocidades cruzeiro, e os modos entre 10 e 14 representam velocidades e acelerações mais elevadas. Assim, para os diferentes modos, a distinção entre veículos ligeiros com motorizações Diesel e a gasolina foi realizada tendo por base dados do parque automóvel nacional. As emissões de PM consideram apenas veículos com motorização Diesel.

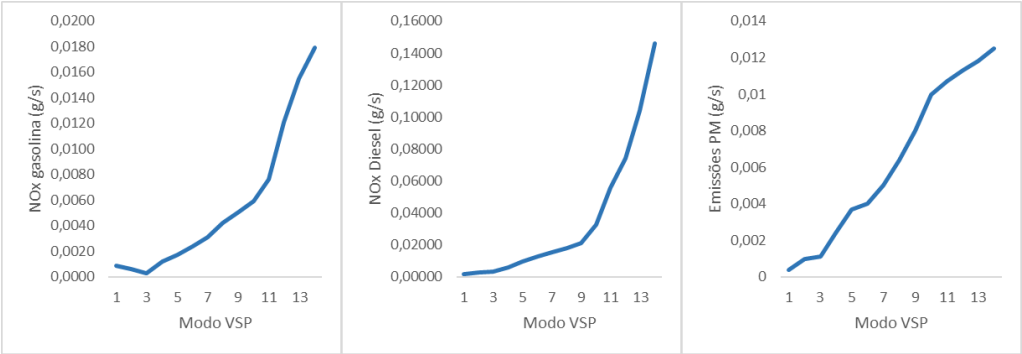


Figura 3: Variação de emissões NO_x e PM₁₀ ao longo dos modos VSP para veículos com motorizações Diesel e Gasolina.

Modelo de emissões TREM

O modelo de transporte para emissões de fontes em linha foi desenvolvido no Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro. O algoritmo de cálculo implementado no modelo estima os fatores de emissão com base na velocidade média de circulação dos veículos, adotando para tal a metodologia MEET/COST.⁶ A estimativa das emissões considera a cinemática de veículos, com uma velocidade média constante e igual para todo o período, neste caso, de 50 km·h⁻¹, velocidade típica de circulação em meio urbano.⁶ O TREM considera ainda diferentes categorias de veículos, nomeadamente ligeiros de passageiros e comerciais, pesados de passageiros e de mercadorias, e motociclos; bem como diferentes tipos de combustíveis (gasolina, gasóleo e GPL), cilindrada e tecnologias. A emissão de poluentes $p(E_p [g])$ para cada segmento de via é estimada pelo modelo de acordo com a equação (2):

$$E_p = \sum (e_{ip}(v) \cdot N_i) \cdot L \quad (2)$$

A variável $e_{ip}(v)$ é o fator de emissão (com base nos fatores de emissão EMEP) (g·km⁻¹) por classe de veículo i e por poluente p , definido em função da velocidade média v (km·h⁻¹); N_i corresponde ao número de veículos da classe i , enquanto que, L corresponde ao comprimento do segmento da via (km).

A distribuição percentual do volume automóvel por categorias de veículos foi realizada tendo por base as estatísticas do parque automóvel em circulação em Portugal por região, segundo a abordagem seguida na aplicação do modelo VSP.

Para todas as aplicações dos dois modelos em análise, os dados de saída, em taxa de emissão de poluente por via de tráfego, foram obtidos numa base horária para as PM10 e NO_x, o que permitiu a realização de simulações numéricas horárias.

Modelo de qualidade do ar

Para o estudo da dispersão em torno da Avenida 25 de Abril, foi utilizado o modelo VADIS, tendo sido realizadas um conjunto de simulações numéricas. O modelo é um sistema integrado composto por dois módulos: o módulo FLOW para simulação do escoamento na camada limite atmosférica, tendo por base uma aproximação euleriana para resolução das equações de *Navier-Stokes*, e o módulo DISPER para o cálculo da dispersão de poluentes atmosféricos, aplicando uma aproximação lagrangeana de trajetória de partículas. Na Figura 4 apresenta-se o esquema bi-modular de funcionamento do VADIS.

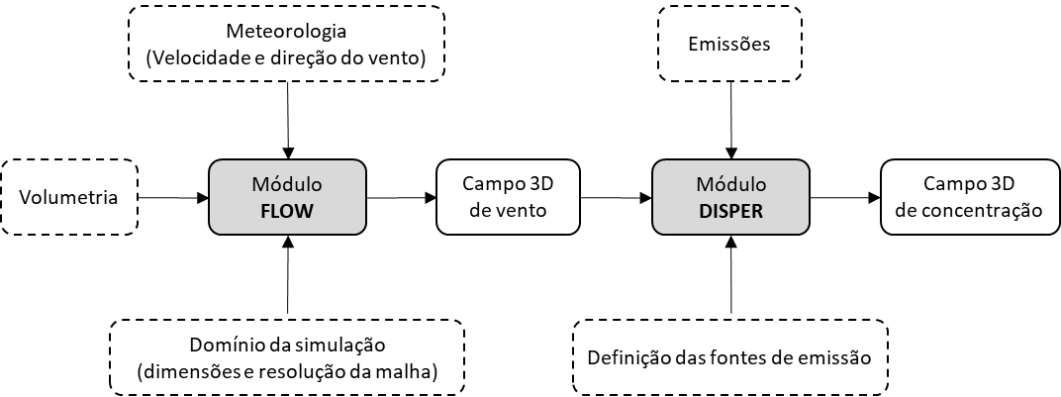


Figura 4: Esquema representativo do funcionamento do modelo VADIS.

A simulação CFD utiliza como suporte a informação cartográfica em SIG (sistema de informação geográfica), o que possibilita a criação de uma configuração virtual da área de estudo, permitindo assim simular a influência de estruturas artificiais ou naturais (por exemplo edifícios ou árvores) no escoamento atmosférico.

A representação realista e detalhada, tanto quanto possível, da volumetria dos elementos artificiais e naturais que possam interferir com o escoamento atmosférico, é um passo essencial na aplicação do modelo VADIS. O modelo requer a criação de uma configuração virtual da área de estudo. O domínio computacional, centrado na estação de qualidade do ar localizada na avenida 25 de Abril, apresenta uma área horizontal de 1248 m x 1248 m e uma altura vertical de 120 m. No interior da canópia urbana foi considerada uma resolução vertical de 3 m, sendo a resolução

horizontal igual a 3 m em todo o domínio de simulação. Foram ainda considerados 297 edifícios e 310 árvores. As condições iniciais do modelo, velocidade e direção do vento, foram definidas através da análise dos dados meteorológicos medidos na estação meteorológica para o período da campanha experimental (numa base horária).

A localização e configuração 3D dos elementos arquitetónicos e paisagísticos existentes na área de estudo foram extraídas através da utilização de imagens de satélite fornecidas pelo *software* Google Earth®, tendo sido submetidas a um tratamento no *software* de sistema de informação geográfica ArcGis®. Esta informação foi utilizada para a recriação virtual das diferentes estruturas (artificiais e naturais) existentes no domínio. Procurou-se definir o domínio de forma tão rigorosa quanto possível, mas garantindo que este era comportável do ponto de vista computacional. Na Figura 5 apresenta-se o domínio gerado virtualmente com recurso às ferramentas ArcGis, 2D.

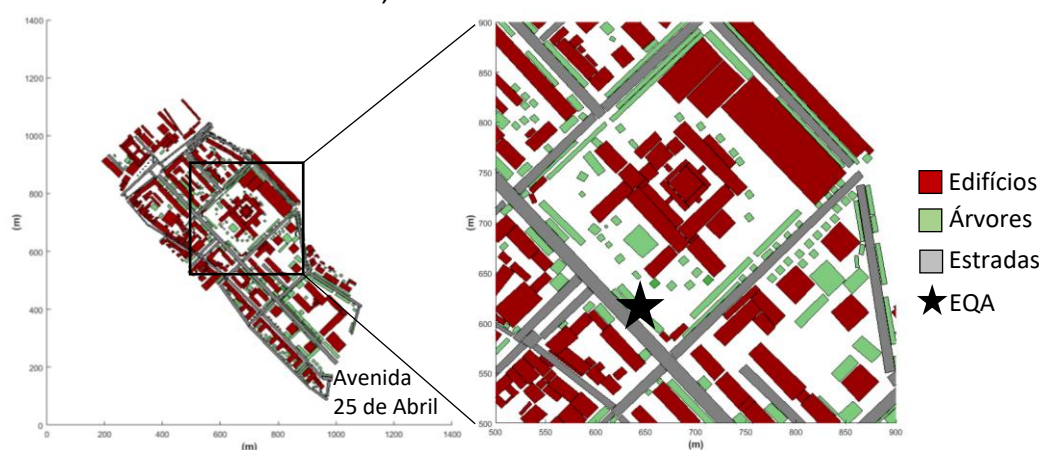


Figura 5: Domínio computacional considerado para as simulações numéricas – Avenida 25 de Abril, Portugal.

Resultados e discussão

Análise comparativa dos modelos de emissões

A Figura 6 apresenta as emissões horárias de tráfego, estimadas com os diferentes modelos de emissões, para os poluentes NOx e PM10, para o período em análise. Verifica-se que as emissões de ambos os poluentes, seguem o perfil horário do volume de tráfego automóvel, isto é, verificam-se emissões mais elevadas nos períodos de ponta (8-9h e 18-19h). Esta conclusão é válida para os dois modelos de emissões em análise. Verifica-se ainda que o modelo TREM é aquele que apresenta as emissões mais reduzidas para ambos os poluentes. Estas diferenças estão associadas à metodologia que está na base dos modelos, isto é, o VSP considera as acelerações, traduzida pelos diferentes modos, enquanto que o TREM considera uma

velocidade constante. Esta diferença na abordagem é extremamente importante no caso de estudo, uma vez que o domínio em causa integra duas escolas, tendo como consequência uma situação de constante pára-arranca dos veículos na proximidade das mesmas, principalmente nos períodos de ponta.

Relativamente às PM10, verificam-se ainda diferenças entre as abordagens do VSP. Tal é justificado pela base de dados utilizada como dados de entrada do modelo de emissões, em que a base de dados COPERT considera uma percentagem inferior de veículos com motorizações Diesel, resultando num fator de emissão de PM10 inferior quando comparado com a base de dados do parque automóvel nacional.

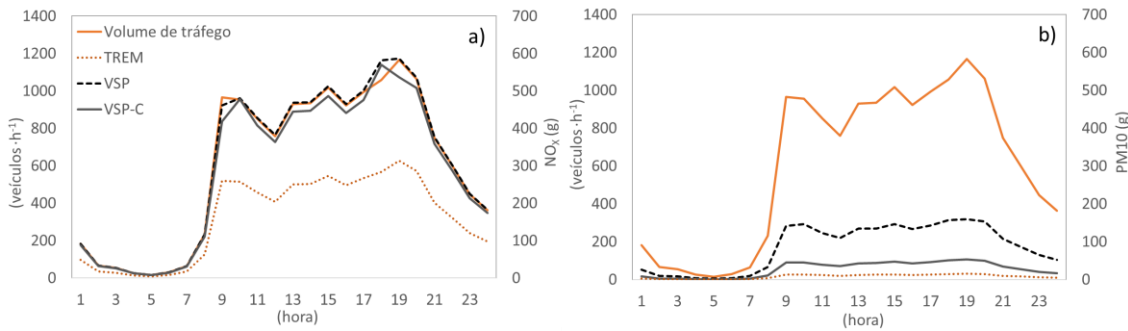


Figura 6: Emissões de tráfego rodoviário estimadas com os diferentes modelos de emissões, para o dia 7 de fevereiro de 2017, para os dois poluentes em análise (a) NOx e (b) PM10.

Avaliação da qualidade do ar

Para avaliar a influência dos modelos de emissões de tráfego no desempenho do modelo VADIS, compararam-se os resultados modelados com os dados monitorizados na estação de qualidade do ar existente no domínio (Tabela 1). Diferentes parâmetros estatísticos foram utilizados para o efeito, nomeadamente, a média, o desvio existente entre as concentrações simuladas e observadas em termos sistemáticos (BIAS), o erro quadrático médio normalizado (EQMN), e o coeficiente de correlação (r). Efetuaram-se dois tipos de análise: i) comparação entre as concentrações simuladas e as concentrações monitorizadas pela EQA; ii) comparação entre as concentrações simuladas, considerando as concentrações de fundo (obtidos através da adição dos valores medidos na estação suburbana de fundo de Ílhavo aos valores simulados pelo modelo CFD), e as concentrações monitorizadas pela EQA.

Os resultados indicam que o modelo VADIS subestimou a concentração de ambos os poluentes durante o período de estudo, quando não são consideradas as concentrações de fundo, traduzido pelos valores negativos do BIAS. Para o NOx, ambos os modelos apresentam um EQMN semelhante, próximos do valor ideal (0), e correlações superiores a 0,8. O modelo TREM é aquele que apresenta um desvio

mais evidente entre dados modelados e dados medidos. Para as PM10, verificam-se valores elevados de BIAS e EQMN, representando um reduzido desempenho do modelo VADIS, independentemente do modelo de emissões utilizado. Esta conclusão é reforçada por um valor negativo do coeficiente de correlação sistemático, que traduz uma relação não linear entre dados modelados e dados medidos, isto é, as duas variáveis não variam da mesma forma ao longo do tempo.

Tabela 1: Parâmetros estatísticos utilizados na análise do desempenho do modelo. Os valores obtidos considerando as concentrações de fundo são apresentados a negrito.

		Média ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	BIAS ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	EQMN (-)	r (-)
NOx	EQA	15,43	-	-	-
	VSP-C	14,25 (23,70)	-1,18 (+ 8,28)	0,45 (0,66)	0,88 (0,90)
	TREM	8,43 (17,89)	-7,00 (+ 2,46)	0,49 (0,20)	0,91 (0,91)
	VSP	15,40 (24,86)	-0,03 (+ 9,43)	0,49 (0,75)	0,88 (0,90)
PM	EQA	21,10	-	-	-
	VSP-C	1,42 (21,00)	-19,68 (- 0,09)	14,32 (0,05)	-0,37 (0,62)
	TREM	0,43 (20,02)	-20,66 (- 1,08)	50,42 (0,04)	-0,38 (0,76)
	VSP	4,49 (24,08)	-16,60 (+ 2,98)	3,72 (0,12)	-0,36 (0,19)

Quando são consideradas as concentrações de fundo, o desempenho do modelo, para ambos os poluentes, é alterado. No caso do NOx, o modelo VADIS sobrestimou as concentrações, tendo sido obtido um valor mais próximo do medido pela estação quando é utilizado o modelo de emissões TREM. É para este modelo de emissões que se verifica, de uma maneira geral, um melhor desempenho do modelo VADIS para todos os parâmetros estatísticos (redução do EQMN e BIAS) para este caso de estudo específico. É, no entanto, ao nível das PM10 que se verificam as maiores diferenças. Considerando as concentrações de fundo, verifica-se uma melhoria de todos os parâmetros estatísticos analisados para ambos os modelos de emissões. No entanto, os melhores resultados são obtidos através do TREM, com um EQMN muito próximo de zero e uma correlação acima dos 0,7, mas resultados bastante semelhantes são obtidos através do modelo VSP quando é utilizada a base de dados COPERT. Estes dados revelam que o tráfego automóvel não é a principal fonte de emissão na área de estudo. Face ao período em estudo (mês de inverno), as emissões associadas à combustão residencial apresentam um papel preponderante, em particular no período entre as 20h-04h.

Conclusões

O objetivo do presente estudo consistiu na avaliação da influência de diferentes métodos de estimativa de emissões, segundo uma abordagem *bottom-up*, no desempenho do modelo CFD VADIS. Foi considerado como caso de estudo uma área

urbana típica da cidade de Aveiro e analisaram-se as concentrações de dois poluentes NO_x e PM. Os resultados para as concentrações de NO_x revelaram um desempenho adequado do modelo VADIS com as duas metodologias de emissões; para este caso de estudo particular, foi ainda analisada a influência das concentrações de fundo nesta estimativa. No que diz respeito às concentrações de PM₁₀, os resultados revelaram que o tráfego rodoviário não é a principal fonte de emissão da área de estudo; face ao período de análise (inverno), a combustão residencial apresenta um papel preponderante. Os resultados reforçam a relevância da precisão dos dados de emissões como condição inicial dos modelos de qualidade do ar, permitindo obter um melhor desempenho e representação mais realista dos fenómenos físicos e químicos da atmosfera, em particular em estudos à microescala.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos seguintes projetos: UID/SEM/00481/2013-FCT e CENTRO-01-0145-FEDER; @CRUISE (PTDC/EMS-TRA/0383/2014), financiado no âmbito do Projeto 9471 – Reforçar a Investigação, o Desenvolvimento Tecnológico e a Inovação (Projeto 9471 – RIDTI) e participado pelo Fundo Comunitário Europeu FEDER; MobiWise (P2020 SAICTPAC/0011/2015), co-financiado por COMPETE2020, Portugal2020 FEDER, e bolsa de pós-doutoramento FCT (SFRH/BPD/100703/2014). Agradecimentos devidos ao Laboratório Associado CESAM - Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (UID/AMB/50017) financiado por fundos nacionais (PIDDAC) através da FCT/MCTES e cofinanciado pelo FEDER (POCI-01-0145-FEDER-007638), no âmbito do Acordo de Parceria PT2020, e Compete 2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI).

Referências

1. European Environment Agency (EEA), *Air Quality in Europe – 2016 report*, EEA Report No 5/2016. Copenhagen. Luxembourg: Publications Office of the European Union 2016.
2. M. C. Coelho, T. Fontes, J. Bandeira, S. Pereira, O. Tchepel, E. Sá, J. H. Amorim, C. Borrego, “Assessment of potential improvements on regional air quality modelling related with implementation of a detailed methodology for traffic emissions estimation”, *Sci. Total Environ.*, **470** 127-137 (2014).
3. H. C. Frey, A. Unal, J. Chen, S. Li and C. Xuan, “Methodology for developing modal emission rates for EPA’s multi-scale motor vehicle & equipment emission system,” Ann Arbor, Michigan: US Environmental Protection Agency, 2002.
4. M. C. Coelho, H.C. Frey, N.M. Rouphai, H. Zhai and L. Pelkmans, “Assessing methods for comparing emissions from gasoline and diesel light-duty vehicles based on microscale measurements,” in *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **14** 91-99, (2009).
5. Emisia SA., COPERT data, retirado a 9 de abril de 2017, de <http://emisiasa.com/products/copert-data>.
6. C. Borrego, O. Tchepel, A.M. Costa, J.H. Amorim, A.I. Miranda, “Emission and dispersion modelling of Lisbon air quality at local scale”. *Atmos. Environ.*, **37** 5197-5205 (2003).